第 37 卷第 11 期
2017 年 6 月

生　态　学　报
ACTA ECOLOGICA SINICA

Vol.37,No.11
Jun.,2017

DOI: 10.5846/stxb201604170709

王甜,康峰峰,韩海荣,程小琴,白英辰,马俊勇,桂志宏.山西太岳山小流域土壤水分空间异质性及其影响因子.生态学报,2017,37(11):3902-3911.

Wang T,Kang F F,Han H R,Cheng X Q,Bai Y C,Ma J Y,Gui Z H.Factors influencing spatial heterogeneity of soil moisture content in a small catchment of Mount Taiyue, Shanxi Province.Acta Ecologica Sinica,2017,37(11):3902-3911.

山西太岳山小流域土壤水分空间异质性及其影响因子

王　甜[1],康峰峰[1],韩海荣[1,*],程小琴[1],白英辰[1],马俊勇[1],桂志宏[2]

1 北京林业大学省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 北京　100083

2 山西省太岳山国有林管理局好地方林场, 沁源　046505

摘要:以山西太岳山华北落叶松林地为主的小流域作为研究对象,采用地统计学方法结合地理信息系统(GIS)技术手段,研究了接石沟小流域土壤水分(0—60cm)的空间变异特征,以及植被分布和地形因子对其影响规律。结果表明:在时间稳定性的前提下,土壤水分含量和变异系数随土层加深逐渐降低。三层土壤水分半方差函数的最优拟合模型为球状模型,变程范围在1.1—1.4 km,均具有强烈的空间自相关性,其中0—20 cm 和 20—40 cm 层土壤水分的空间异质性程度高于40—60 cm 土层,以中间层的结构因素占总变异比例最大。自然结构因素(地形、母质、植被和土壤等)对不同土层土壤水分的总空间变异性起主导作用(81.4%—91.3%),而随机因素(取样误差、人为干扰等)的影响相对较小(8.7%—18.6%)。沿着集水线由西-东方向,从边缘的土壤水分高值斑块区逐渐过渡到明显的低值斑块区,梯度变化明显。研究发现,在植被覆盖异质性小的山地,土壤水分的空间异质性主要由地形因素引起,具体表现为其与坡向指数(TRASP)、坡度、海拔和土壤有机碳、全氮呈极显著相关关系($P < 0.01$),而与植被指数(NDVI)呈弱的负相关关系。叠加分析显示,在阴坡、坡度较缓($< 15°$)及高海拔叠合的区域土壤水分含量较高。研究结果可为山地人工林构建和植被恢复中土壤水资源的利用以及水分管理策略的制定提供理论依据。

关键词:小流域;土壤水分;空间异质性;华北落叶松;影响因子

Factors influencing spatial heterogeneity of soil moisture content in a small catchment of Mount Taiyue, Shanxi Province

WANG Tian[1],KANG Fengfeng[1],HAN Hairong[1,*],CHENG Xiaoqin[1],BAI Yingchen[1],MA Junyong[1],GUI Zhihong[2]

1 *Key Laboratory of Ministry of Forest Cultivation and Conservation of Ministry of Education*,*Beijing Forestry University*,*Beijing* 100083,*China*

2 *Haodifang Forest Farm of Taiyue Forestry Bureau in Shanxi*,*Qinyuan* 046505, *China*

Abstract: Soil moisture is a hydrological characteristic that plays a crucial role in the soil-plant-atmosphere continuum. The spatial distribution of soil moisture and factors that influence this distribution are extremely important to many ecological processes, especially in temperate mountain forest regions such as those in northern China. Nonetheless, little is known about soil moisture heterogeneity in typical subalpine forest lands or the controlling factors of soil moisture change. In this study, soil moisture content (SMC) was measured for depths of 0 to 60 cm in a typical watershed forest, dominated by *Larix principis-rupprechtii*, in Taiyue Mountain, Shanxi Province. We used Geographic Information System (GIS) data and geostatistical methods to examine the spatial heterogeneity of SMC and the factors (i.e., vegetation and topography) that influence it. SMC and its coefficient of variation (*CV*) decreased with increasing soil layer depth, exhibiting high to moderate variation under an assumption of time stability. At this small watershed scale, the best-fit model for SMC of the three layers (0—20 cm, 20—40 cm, and 40—60 cm) is the spherical model; the spatial autocorrelation distance ranged from 1.1 to 1.4 km. The distribution of SMC has strong spatial autocorrelation in all three layers. The degree of spatial

基金项目:国家林业公益性行业科研专项(201404213)

收稿日期:2016-04-17;　　**网络出版日期:**2017-02-22

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: hanhr@ bjfu.edu.cn

heterogeneity of soil moisture in the 0—20 cm and 20—40 cm soil layers was higher than that in 40—60 cm layer. The structural characteristics of the middle layer accounted for the largest proportion of the total variation. Spatial variability of soil moisture was mainly (81.4% to 91.3%) controlled by natural structure factors such as topography, parent material, vegetation properties, and soil properties, while the influences of random factors such as sampling error, human disturbance, plant root distribution, and absorption were relatively small (8.7% to 18.6%). Moran's *I* values indicated that soil moisture had moderately aggregated distributions (0.44—0.51) across soil depths. The overall trend of SMC spatial distribution gradually transitioned from high to low values from west to east along with the waterline, an obvious gradient change. We also found that the spatial heterogeneity of soil moisture was mainly controlled by terrain factors in this mountainous catchment with homogeneous vegetation cover. Spatial variability of soil moisture was significantly correlated with topographic factors (such as aspect, slope, and elevation) and soil chemical properties (such as soil organic carbon and total nitrogen) ($P<0.01$). However, it was weakly and negatively correlated with the normalized difference vegetation index (NDVI). Overlay analysis suggested that SMC was relatively high in regions where the three attributes of shady slope, smooth slope (<15 degrees), and high altitude overlapped. Moreover, soil moisture variation nearly matched the color depth change in a superimposed terrain map. Taken together, the results of this study provide data for planning the use of soil water resources in artificial vegetation restoration and construction of temperate subalpine forests and a theoretical basis for devising water management strategies.

Key Words: small watershed; soil moisture content; spatial heterogeneity; *Larix principis-rupprechtii*; influencing factors

水是维持植物生长的主导因子,是维持森林生态系统稳定性的重要因素之一[1]。在流域尺度上,水流在重力作用下汇集,使得不同景观要素之间的物质流和能量流的联系更为紧密,而流域的下垫面因素(如地形、植被和土壤特征等)均会对流域的水文特征产生显著的影响[2]。在暖温带山地针叶林区,土壤水分作为流域水文特征的关键表征,是森林生态系统物质循环的载体,在土壤-植被-大气连续体间水文过程及能量交换中起着重要作用[3]。由于土壤水分与地形、土壤和植被间的复杂作用关系,其在不同空间尺度上存在较大变异性[4-5]。

近年来,国内外学者对于土壤水分不同尺度的空间异质性进行了大量研究,地理信息系统和地统计学方法相结合已成为此类研究的有效工具,但主要集中在农田和草地,有关于林地土壤水分空间变异的研究较少[6]。Savva 等[7]研究了美国马里兰州郊区不同森林和草地覆盖下浅层土壤水分的空间分布格局。Rosenbaum 等[8]在德国云杉覆盖为主的集水区展开研究,揭示了不同深度(5、20、50 cm)土壤水分的时空变异规律。王存国等[9]对长白山阔叶红松林 3 块 50 m×50 m 样地表层土壤水分空间异质性进行了研究。上述研究的范围从样地到集水区尺度不等,以低海拔(<800 m)的土壤表层水分研究为主。对于亚高山山地森林覆盖为主的小流域研究甚少,地形的起伏使得土壤水分的再分配过程更加复杂,而土壤更深层次水分的空间变异对于植被的生长和生态系统水分平衡同样具有重要的作用。

国内在干旱半干旱黄土丘陵区的小流域研究发现,土壤水分空间异质性是多重尺度上环境因子共同作用的结果,降水强度、地质地貌等主要影响其空间分布[4,10]。国外研究表明,小流域土壤水分受到土壤性质、地形特征、气象条件、植被覆盖和地下水状况等因素的影响[7],但对于不同的空间尺度,各环境因子对于其影响程度不尽相同,景观尺度上土壤水分的时空异质性与环境因子的关系已成为国内外的研究热点[4]。华北晋东南的亚高山山地主要以针叶人工林为主,有学者提出大规模的造林虽增加了碳储量,但可能会引起土壤干燥化效应[11]。因此,掌握土壤水分的空间尺度分异特征及其影响因素对于华北森林景观的有效经营与管理,防止土壤干化与侵蚀,实现森林生态服务功能的最大化发挥都显得尤为重要。本研究从小流域尺度上对暖温带森林土壤水分的空间分布模式、尺度依赖性及其控制因子进行研究,为理解亚高山山地森林不同尺度上土壤水分的空间变异及水文过程提供依据。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

研究地处于山西省太岳山好地方林场的接石沟集水区(36°47′24—43″N, 111°59′43″—112°03′34″E),面积为5.65 km^2,隶属于太行山支脉太岳山中部,黄土高原的东缘。该地区气候属暖温带半湿润大陆性季风气候,年平均气温8.7 ℃,年日照2600 h,年平均降水量为660 mm,雨量主要集中在7、8、9月,无霜期110—180 d。集水区海拔2037—2359 m,岩石主要为石灰岩和花岗片麻岩,土壤亚类有褐土、棕壤和山地草甸土,随海拔呈地带性分布。

研究区内,植被类型以华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)人工林为主,约占流域面积的80.5%,其中以近熟林(31—40a)为主,广泛分布于集水线两侧。次生林如白桦(*Betula platyphylla*)和黄华柳(*Salix caprea*)等零星分布于小流域海拔较低的区域,常与年龄较小的落叶松(<30a)形成针阔混交林。各植被类型的林分结构特征见表1。灌木主要有土庄绣线菊(*Spiraea pubescens*)、毛榛(*Corylus mandshurica*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、黄刺玫(*Rosa xanthina*)等;草本层的代表植物有细叶薹草(*Carex lanceolata*)、小花风毛菊(*Saussurea parviflora*)、小红菊(*Dendranthema chanetii*)等。

表1 研究区主要植被类型的林分结构特征

Table 1 Stand structure characteristics of the main vegetation types in the study area

林分类型 Stand types	林龄 Age/ a	密度 Density /(株/hm^2)	平均树高 Mean height/m	平均胸径 Mean DBH/cm	平均冠幅 Mean crown width /m	平均冠高 Mean crown height /m	郁闭度 Canopy density/%	土层深度 Soil depth/m
华北落叶松人工林	幼龄林(<20)	1566.67	8.19	9.58	3.29	7.21	80.00	0.50
	中龄林(21—30)	1027.78	13.09	13.40	4.34	10.10	75.00	0.55
	近熟林(31—40)	1576.73	16.47	20.67	4.95	13.60	80.00	0.60
	成熟林(>40)	1238.89	20.25	25.87	5.95	16.10	85.00	0.75
阔叶林	—	1677.83	7.15	7.38	3.14	5.63	80.00	0.50
针阔混交林	—	2016.67	6.38	6.98	2.73	4.15	85.00	0.55

1.2 样品采集与测定

结合研究区1:5万地形图和植被分类图,于2015年10月20日采集研究区土壤样品。因高海拔山区地形复杂、采样难度较大,常用的网格采样法在本研究区实施困难,因此采用代表不同植被类型、地形条件,兼顾均匀分布的采样方法选择样地[12](表2)。样点数量为81个,采样间隔约为260 m,确保均匀取样,充分涵盖小流域的自然特征。海拔、坡度、坡向等地形因子从DEM(Digital elevation model)中提取,DEM由10m等高距的地形图数字化产生。植被类型分布从2014年9月30日高分辨率的资源三号遥感卫星影像解译获取。另外,植被生长状态和植被覆盖度用归一化植被指数*NDVI*表示,该指数从影像多光谱数据的近红外波段和红外波段计算而得[13]。

为了便于分析比较,在取样前一周内天气稳定,基本无明显降雨的晴天集中采样,并于1天内尽量将土样采集完毕。用手持GPS记录采样中心点坐标,在以该点为中心的1m正方形小样方内均匀确定3个采样点,每个采样点用直径为3 cm的土钻取表层(0—20 cm)、中层(20—40 cm)、底层(40—60 cm)共3层土壤,每层分别取20 g土样,剔除明显的植物断根和枯落物等杂质,等量充分混合后取1/3装入编号的铝盒中,带回实验室。采用同样的方法另取100 g土样装入自封袋测定土壤的化学性质。表层土共采集162份样品,但由于部分采样点的基岩深度较浅,中层和底层的土样数量分别为144份和120份。采用烘干法对土样的土壤含水量进行测定,将称量后的土壤样品(精确到0.01 g),在(105±2)℃的烘箱内烘至12 h,取出后称量,进而计算土壤含水量,共测定81个样点的213份样品。另外同等数量的样品采用Flash 2000有机元素分析仪(Thermo Scientific, Brookfield, Wisconsin, USA)测定土壤有机碳和全氮。

表 2　研究区不同地形与植被类型取样点数量分布

Table 2　Distribution of sampling points in different terrain and vegetation types

分类 Class	植被类型 Vegetation types	样点数 Number	海拔 Elevation /m	样点数 Number	坡向 Aspect	样点数 Number	坡度 Slope/(°)	样点数 Number
1	华北落叶松幼龄林	13	<2200	39	阴坡	19	<10	4
2	华北落叶松中龄林	20	2200—2300	14	半阴坡	26	10—15	11
3	华北落叶松近熟林	27	>2300	28	阳坡	26	15—20	24
4	华北落叶松成熟林	8			半阳坡	10	20—25	20
5	阔叶林	3					>25	22
6	针阔混交林	6						
7	灌木林	4						

华北落叶松幼龄、中龄、近熟和成熟林分别是<20a, 21—30a, 31—40a 和>41a 生的华北落叶松人工林,阔叶林主要为白桦次生林,针阔混交林为华北落叶松和白桦混交林

在数据处理时,坡向方位角按照 Roberts & Cooper[14] 的方法进行了转换,坡向由 0—360°的罗盘值转换成 0—1 之间的值。转换公式为:

$$\mathrm{TRASP}=\{1-\cos[(\pi/180)(\mathrm{aspect}-30)]\}/2$$

式中,TRASP (transformation of aspect)为坡向指数;aspect 为坡向方位角度。通过转换,TRASP 介于 0—1 之间,其值越大,表示生境越干热,0 代表北北东方向,1 代表南南西方向。

1.3　空间格局分析

1.3.1　半方差分析

林地土壤水分为区域化变量,同时具有随机性和结构性(空间自相关性)特征,当土壤水分变量满足二阶平稳假设和本征假设,且样本数量足够大时,可应用半方差分析[15]。根据 Matheron[16],半方差函数 $\gamma(h)$ 计算公式为:

$$\gamma(h)=\frac{1}{2N(h)}\sum_{i=1}^{N(h)}[z(x_i)-z(x_i+h)]^2$$

式中,h 为两样本点空间分隔距离; $N(h)$ 为在分隔距离为 h 时的样本对总数; $z(x_i)$ 和 $z(x_i+h)$ 分别为区域化变量 $z(x)$ 在空间位置 x_i 和 x_i+h 处的实测值。

半方差分析结果反映了数据的空间关联程度,只有数据具有空间自相关性,空间插值才有意义。$\gamma(h)$ 中的块金值(C_0)表示随机部分的空间异质性,而(C)表示空间自相关部分的空间异质性,基台值(C_0+C)表示区域化变量的最大变异。[$C_0/(C_0+C)$]为基底效应,表示样本间随机因素引起的变异程度,该值越小,空间相关性越强,按照区域化变量空间相关性程度的分级标准[17],该值为<25%、25%—75%、>75%时,分别表明变量的空间相关性为较强、中等、较弱。

1.3.2　空间自相关分析

空间格局的关联程度采用了 Moran 的 I 指数法,采用该指数以探明土壤水分变量的分布是否聚集、离散或者随机分布。公式为[18]:

$$\text{Moran's } I=\frac{N\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}W_{ij}(x_i-\bar{x})(x_j-\bar{x})}{\left(\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}W_{ij}\right)\sum_{i=1}^{N}(x_i-\bar{x})^2}$$

式中, x_i 和 x_j 分别为景观要素 x 在空间单元 i 和 j 中的观测值, $\bar{x}$ 为 x 的平均值, W_{ij} 为相应权重,N 为空间单元总数。Moran's I 的值域为[-1,1],取值为-1 表示完全负相关,取值为 1 表明完全正相关,而取值为 0 表示随机分布,无空间自相关性。

1.4　数据处理与分析

运用 SPSS18.0 对数据进行 Kolmogorov-Smironov (K-S)正态分布检验和基本统计分析,运用地统计学软件

包 GS+ for windows 9.0 和 Arcgis10.0 进行半方差分析和 Kringing 内插局部估计。

2 结果与分析

2.1 土壤水分的取样时间与统计特征

研究区自动气象站 2015 年的降雨监测数据显示(图 1),10 月份降雨总量为 58.67 mm,月均温为 5.08℃。降雨主要集中在月底,本次采样的时间点为 10 月 20 日,在 18 日只有一次 0.25 mm 的小雨,加之气温较高,蒸发量大,土壤较干,为分析土壤水分的空间异质性提供了时间上的相对稳定性。表 3 为小流域各植被类型下不同土层中土壤水分的描述性统计结果。从表中可知,随着土层深度的逐渐加深,土壤含水量的平均值依次降低。不同土层的土壤水分的水平变异均表现为自表层向下显著降低趋势,土层 40 cm 以上表现出强变异性(>35%),40 cm 以下为中等变异性(15%<CV≤35%)[19]。

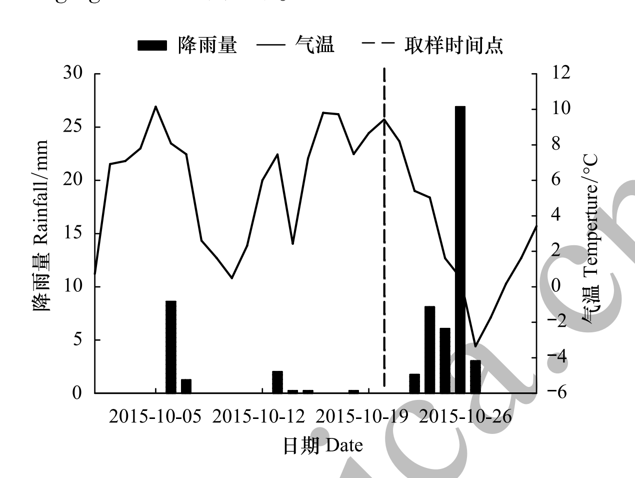


图 1 研究区 10 月份雨热特征与取样时间点

Fig.1 Characteristics of rain and heat of October in the study area and the sampling time points

半方差函数通过区域化变量分割等距离样点间的差异来研究变量的空间相关性,进行空间相关性分析的变量须满足正态分布[18]。表 3 中显示 K-S 检验的 $P_{k\text{-}s}$ 值>0.05,认为数据服从正态分布,可进行空间相关分析,并且 20 cm 以下土层土壤水分含量的 $P_{k\text{-}s}$ 值要明显优于 0—20 cm 土层。

表 3 不同土层深度土壤水分的描述性统计结果

Table 3 Classical statistics analyses of the soil moisture in different soil layers

土层 Depth/cm	样本量 Sample size	最小值 Min./%	最大值 Max./%	平均值 Mean /%	标准差 Standard deviation	变异系数 Variation coefficient /%	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	*K-S* 值 *K-S* value
0—20	81	5.46	28.90	15.75	6.14	38.98	0.34	−0.73	0.29
20—40	72	4.89	25.76	13.02	4.81	36.94	0.35	0.47	0.85
40—60	60	5.66	21.67	12.54	4.09	32.62	0.45	0.64	0.60

不同土层样本量不一致是由各样点土层深度不同所致

2.2 不同深度土壤水分的空间异质性

图 2 和表 4 为不同土层深度土壤水分在各向同性下的变异函数理论模型及相关参数。从表中可知,不同土层土壤水分的基台值远大于块金值,表明在全方向上土壤水分的 3 个层次均具有明显的空间自相关结构,其中0—20cm和20—40cm层土壤水分的基台值高于40—60cm土层,说明表层和中层的空间异质性程度

表 4 各向同性下变异函数理论模型及参数

Table 4 Parameters of the best-fitted semi-variogram model for isotropic variogram

土层 Depth/cm	理论模型 Theoretical model	块金值 Nugget C_0	基台值 Sill C_0+C	变程 Range A/m	决定系数 Determination coefficient R^2	残差 Residual RSS	块金/基台 Nugget/Sill $C_0/(C_0+C)$ /%	交叉验证 Cross-validation RMSE	交叉验证 Cross-validation AME	莫兰指数 Moran′ I
0—20*	Spherical	0.031	0.190	1140	0.90	4.40×10^{-3}	16.5	0.83	0.023	0.492
20—40*	Spherical	0.016	0.183	1393	0.83	8.32×10^{-3}	8.7	1.11	−0.011	0.436
40—60*	Spherical	0.020	0.110	1115	0.68	5.35×10^{-3}	18.6	1.03	0.027	0.511

*表示数据经 log 转换,因数据经 log 转换后,空间结构的规律性更明显,且残差较小,符合正态分布;RMSE 为标准均方根预测误差(Root-Mean-Square Standardized Error),值越接近于 1,误差越小;AME 为平均标准误差(Average Mean Error),值越接近于 0,误差越小

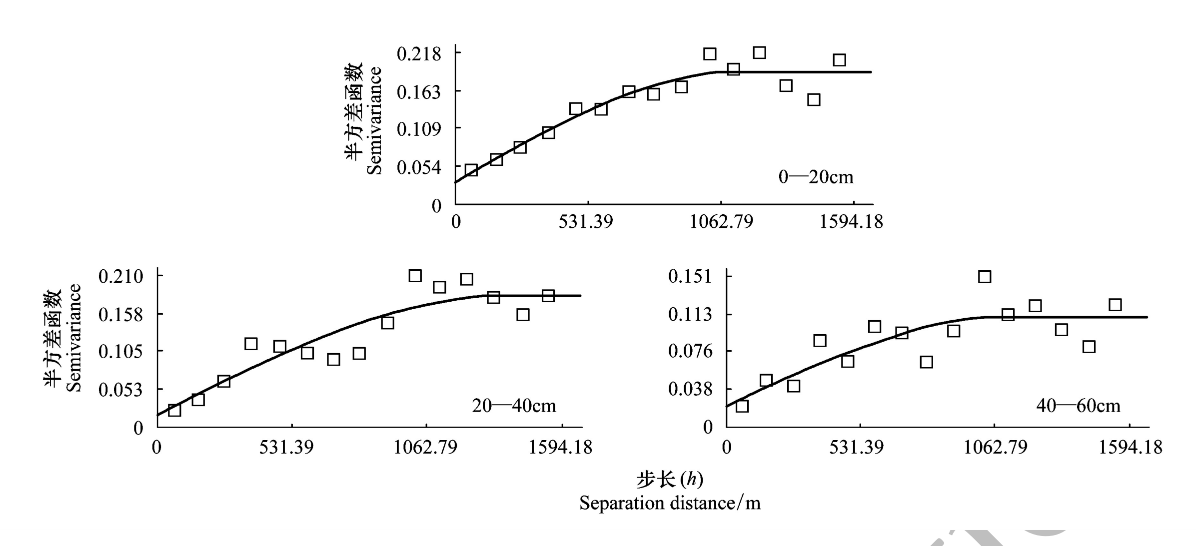


图 2　森林土壤水分的各向同性半方差函数

Fig.2　Isotropic semi-variogram of forest soil moisture content

明显高于底层。三层土壤水分的半方差函数与步长 h 的关系均符合球状模型,具体特征表现为空间相关性随距离的增加而衰减,其空间结构是当样点间隔距离达到变程(如 $A_{0—20\ cm}$:1140 m)之前,样点的空间相关性随样点距离的增加逐渐降低直至消失(图 2)。

从决定系数 R^2 和残差 RSS 来看(表 4),0—20 cm 和 20—40 cm 土层土壤水分半方差函数与步长 h 关系的理论模型解释效率相对较高(90%和 83%),而 40—60 cm 土层的半方差函数模型解释效率较低(68%),3 个土层水分模拟的残差 RSS 值均较低($4.40×10^{-3}$—$8.32×10^{-3}$)。

由表 4 可知,不同土层土壤水分的空间异质性中自相关和随机部分所占比例存在一些差异。0—20 cm 和 40—60 cm 土层土壤水分的 $C_0/(C_0+C)$ 值相对于 20—40 cm 层较高,说明表层和底层由随机部分引起的空间异质性高于中层,即中层由空间自相关部分引起的空间异质性较高。结构方差比 $C/(C_0+C)$ 表明结构因素对于表、中、底层的空间变异性的贡献率分别达到 83.5%,91.3%和 81.4%,且残差 RSS 较小。根据相关性程度的分级标准,三层土壤的 $C_0/(C_0+C)$ 值均明显低于 25%,说明具有强烈的空间相关性。结合当地华北落叶松及生境的实际情况,自然结构因素(如气候、植被、母质、地形和土壤类型等)对不同土层土壤水分的总空间变异性起主导作用(81.4%—91.3%),而随机因素(如取样误差,人为干扰,植物根系分布与吸收等)的影响相对较小(8.7%—18.6%)。

变程 A 可反映区域化变量的空间作用范围,其大小受观测尺度限定,在变程范围内,样点间的距离越小,其空间相关性越大。由图 2 和表 4 可知,0—20 cm 和 40—60 cm 土层土壤水分的变程比较接近(1140 m 和 1115 m),而 20—40 cm 中层土壤水分的变程较大(1393 m),说明其在较长距离内存在空间结构异质性,而当超过此变程时,土壤水分的空间相关性消失。Moran′ I 指数表示全局的空间自相关程度,3 个层次土壤水分的 Moran′ I(0.436—0.511)均远远大于 0,说明全局土壤水分的空间相关性较明显,呈聚集分布。其中,底层土土壤水分的 Moran′ I 指数为 0.511,空间相关性又较表层和中层略强。

2.3　土壤水分的空间分布格局及驱动因子分析

图 3 为不同土层土壤水分的空间分布特征。据图可知,沿着集水线由西-东方向,0—20 cm 和 40—60 cm 层从边缘的土壤水分高值斑块区,逐渐形成明显的低值斑块区,梯度变化明显。而 20—40 cm 的水分高值区向下往南部延伸,但总体趋势与上下两层相似,呈现出西侧大于东侧的现象。结合地形因子,在阴坡、坡度较缓(<15°)及高海拔叠合的区域土壤水分含量较高,地形因子叠加的高低区域与表层土壤水分的变化规律大致吻合。其中,表层土最高值区的土壤含水量为 24.66%—28.90%,最低值区为 5.47%—7.80%;中层土最高值区含水量为 20.93%—25.77%,最低值区为 4.89%—6.86%;底层土高值区的含水量为 19.07%—21.68%,低值

区为5.66%—7.27%，表现出全局土壤水分的高值区随土层加深逐渐降低，而低值区却呈现出先降低后升高的波动趋势。

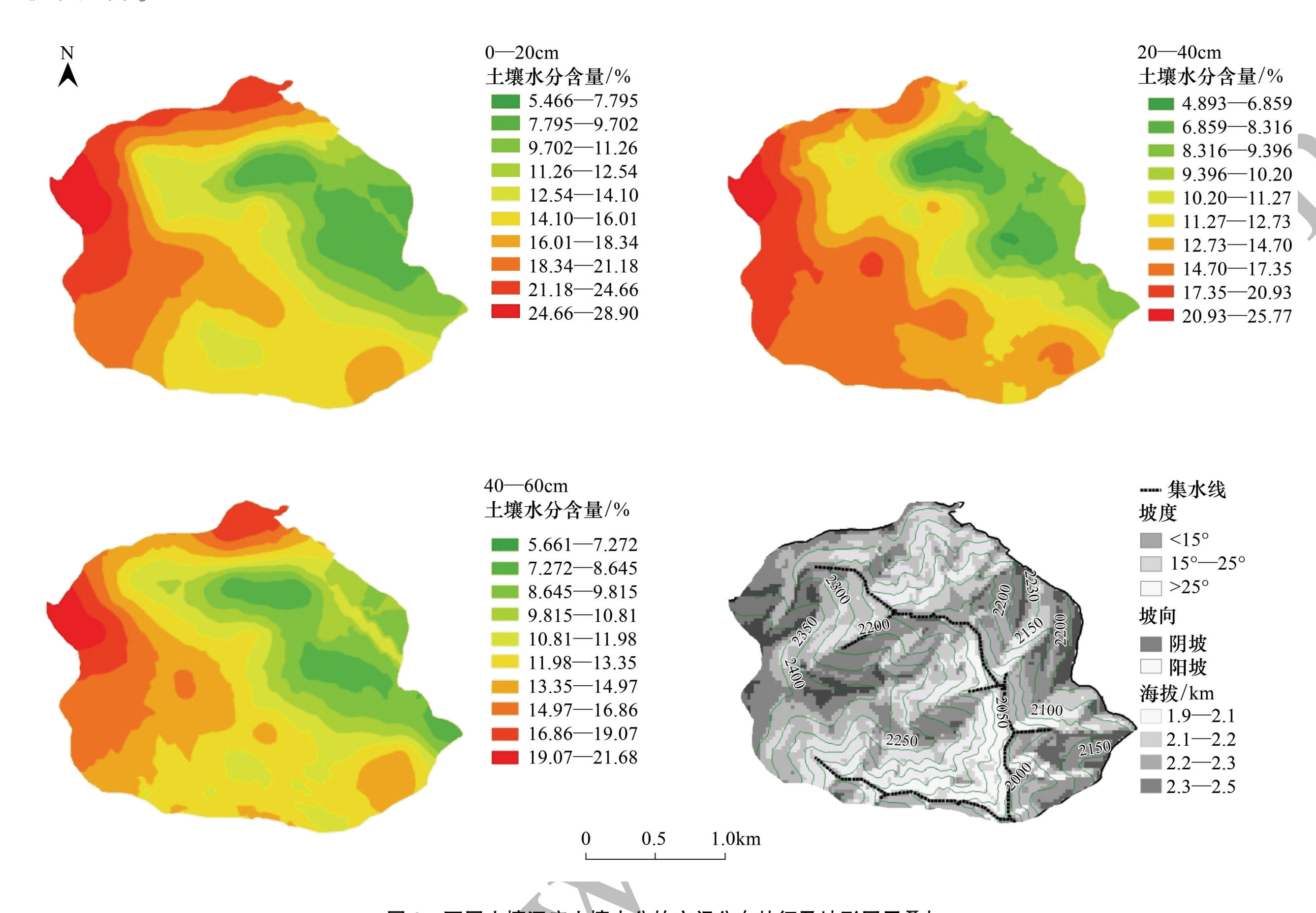


图 3 不同土壤深度土壤水分的空间分布特征及地形因子叠加

Fig.3 Spatial distribution characteristics of soil moisture content across depths and overlay of topographic factors

SMC（soil moisture content）表示土壤水分含量

从表 5 中可以看出，不同深度的土壤水分含量与地形因子（海拔、坡度、坡向）表现出显著的相关关系（$P<0.01$），而与植被指数 NDVI 为负相关关系，却不显著，说明山区森林土壤水分的空间异质性主要是由地形因素引起的。坡向指数与三层土壤水分随土层表现出逐渐增强的负相关关系，说明生境为阴坡、湿冷的环境，蒸发量较小，有利于土壤的蓄水。海拔对 0—60cm 土壤水分的影响为强烈的正相关性，即海拔越高，土壤水分越易保持。坡度越大，土壤含水量越低，反之，越高。海拔和坡度对土壤水分的影响随着土层的加深逐渐减弱（海拔：0.73—0.69，坡度：-0.58—-0.50，$P<0.01$）。另外，土壤水分与土壤化学性质（有机碳、全氮含量）具有显著的正相关关系（$P<0.01$），说明土壤有机质和全氮含量对土壤水分具有显著影响。结合植被分布情况，土壤水分的高值斑块区域主要分布在华北落叶松近熟林下，而落叶松成熟林、混交林和灌木林下土壤水分值相对较低。

表 5 不同深度土壤水分与地形、植被因子和土壤化学性质之间的相关关系

Table 5 Correlations between soil moisture content, topographic, vegetation factors and soil chemical properties

土层 Depth /cm	坡向指数 TRASP	海拔 Altitude/m	坡度 Slope/(°)	植被指数 NDVI	土壤有机碳含量 Soil organic carbon/%	土壤全氮含量 Soil totalnitrogen/%
0—20	-0.406**	0.733**	-0.585**	-0.156	0.601**	0.685**
20—40	-0.413**	0.711**	-0.580**	-0.210	0.571**	0.649**
40—60	-0.505**	0.695**	-0.504**	-0.227	0.671**	0.762**

** $P<0.01$ 水平上显著相关

3　讨论

3.1　小流域土壤水分的时间稳定性与变异系数

有学者提出在研究土壤水分的空间分布时,因土壤含水量在很大程度上取决于土壤结构,假设其在时间上具有一定的稳定性,且用非参数法和时间标准均方差比较进行了验证,证明土壤水分的空间分布具有较强的时间稳定性[20]。本研究取样的间隔时间较短,天气状况稳定,因此土壤水分具有相对的时间稳定性。暖温带亚高山森林小流域土壤水分各层变异系数介于32.62%—38.98%之间,此值范围稍高于阔叶红松林(24%左右)[9]及人工油松林(10%—25%)[21],可能是由于已有的山地森林土壤水分空间异质性研究大多基于样方和坡面尺度,森林小流域尺度的范围较大,导致植被、土壤及地形类型有所差异;另外砾石含量相对较多且采样节点土壤较干(12.54%—15.75%)也是引起变异系数稍大的原因之一。土壤水分变异系数的层次递减规律与莫菲等[22]对相近纬度的六盘山洪沟小流域落叶松植被下土壤水分的研究结果相似。

3.2　小流域土壤水分的空间自相关性

研究区土壤水分表现为强烈的空间自相关性,其结构性方差在81.40%—91.30%,变程在1.1—1.4 km之间。森林土壤水分在时间稳定下较强的空间自相关性与已有的多数研究结果相吻合[1,8,23]。但Western等提出当取样间隔大于变程、取样点数量太少以及土壤水分的测定误差大于其变异等因素时会引起土壤水分弱或无空间相关性[24]。与已有研究相比,本文的最大变程相对小流域尺度的其他研究要大[25-26],分析其原因一方面可能是接石沟小流域分布着大面积的华北落叶松(覆盖面积约占80%),树木的年龄、空间分布和垂直结构都相对均一,植被斑块均质化,使得土壤水分的自相关范围延长。这可能也与地形特征有关,研究区范围的平均坡长在900 m左右,在一定程度上可以解释空间自相关变化的范围。值得注意的是,现有的采样尺度可能在更大范围内仍然存在空间异质性。本研究的平均采样距离为263 m,低于变程范围的一半,说明在此小流域尺度下,采样密度和方法足以说明该区域土壤水分的空间异质性,该结果对今后典型森林小流域的取样间隔设置具有一定的借鉴作用。

3.3　不同层次土壤水分空间异质性的影响因素

土壤水分空间异质性与植被、地形因子和土壤性质有着密切的联系。研究结果得出,土壤含水率随着海拔的升高显著上升。结合植被分布,海拔高的地区植被多为华北落叶松人工纯林,而海拔相对低的地区还有一些阔叶林分布,如白桦(*Betula platyphylla*),黄花柳(*Salix caprea*)等,阔叶树种的叶片表面积大,蒸发量较大,导致土壤水分偏低,而海拔高的针叶林可以减少水分和热量的蒸发,因而土壤水分偏高。另外,坡度越陡,入渗率低,下渗和径流越强,导致土壤水分含量较少,反之越易于保持水分。坡向偏向于阴坡,蒸发量小,有利于水分聚集,反之蒸发量大,土壤水分损耗大,与一般研究的结论相似[5,27]。在与植被的关系方面,Schume等[28]认为森林强大深厚的根系对于土壤水分的吸收作用比农田或草地等生态系统更明显,是影响土壤水分的主控因子。而本研究得出植被NDVI指数对于土壤水分有弱的负影响。NDVI意味着高的叶面积指数和植被覆盖度,相应的蒸发量也越大,导致与土壤水分负相关,且在采样时间节点,土壤较干,地形和土壤性质的影响要大于植被,这与Grayson等[27]的研究结论一致。从具体林分结构看,近熟林的冠层不如成熟林的郁闭,冠幅、冠高和根系深度均小于成熟林,叶片面积又较混交林的要小,导致近熟林地的蒸发蒸腾小于成熟林与混交林,而灌木林分布分散,其所在区域土层较浅,不易储存水分,说明林分的结构特征也是导致土壤水分空间异质性的重要原因。另外,有研究表示土壤的持水性能还与有机质含量及大于0.25 mm的水稳性团聚体有关[29],这一观点与本文森林土壤水分含量和有机碳、全氮显著正相关的结果相吻合。从土壤不同层次看,Rosenbaum等[8]研究表明,土壤上层(<20cm)水分主要受到坡位、坡度等地形条件和小气候条件下的蒸发力影响,随着土层加深,土壤水分受蒸发作用减小,而受植被蒸腾作用加大。本文统计结果显示,海拔和坡度等地形因子在随着土层深度加深,与土壤水分的相关系数减弱,而植被指数(NDVI)则与土壤水分的相关性增强,由此可看出,随着土层的加深,地形的作用逐渐减弱,植被蒸腾作用加大。

4 结论

在亚高山山地华北落叶松林分布为主的小流域,地形较复杂,土壤水分含量及变异系数在表层(0—20cm)最大,随着土层加深逐渐递减。三层深度土壤水分均呈强烈的空间自相关,其中以中间层的空间自相关性最强,由结构因素部分引起的空间自相关性占主导地位,随机部分引起的误差较小。采样密度能满足土壤水分空间变异分析的要求。在植被覆盖异质性小的山地,地形起伏对土壤水分的影响起着主导作用,但随着土层的加深,其作用减弱,植被特征(林分年龄与结构)的影响逐渐增强。土壤水分含量随着海拔的上升、坡度的减小和坡向的偏北而增高,反之亦然。地形的影响与植被因素密不可分,土壤水分从山顶华北落叶松近熟林到沟口混交林、灌木林呈梯度递减趋势。

研究土壤水分空间异质性的最大困难在于土壤水分随时间变化较大,且在不同尺度上变化规律不同[23]。本文只对特定时间内土壤水分空间变异性的一些规律进行探讨,要全面了解华北地区典型山地森林土壤水分的空间变异规律,还需要对土壤水分随时间变化进行观测,并在不同尺度上做进一步研究。

参考文献(References):

[1] 李猛, 段文标, 陈立新, 魏琳, 冯静, 王誓强. 红松阔叶混交林林隙土壤水分分布格局的地统计学分析. 生态学报, 2012, 32(5): 1396-1402.

[2] 余新晓, 李秀彬, 夏兵. 森林景观格局与土地利用/覆被变化及其生态水文响应. 北京: 科学出版社, 2010: 19.

[3] Bernacchi C J, VanLoocke A. Terrestrial ecosystems in a changing environment: a dominant role for water. Annual Review of Plant Biology, 2015, 66: 599-622.

[4] 邱扬, 傅伯杰, 王军, 陈利顶. 黄土丘陵小流域土壤水分的空间异质性及其影响因子. 应用生态学报, 2001, 12(5): 715-720.

[5] 王晓学, 沈会涛, 李叙勇, 景峰. 森林水源涵养功能的多尺度内涵、过程及计量方法. 生态学报, 2013, 33(4): 1019-1030.

[6] Walker J P, Willgoose G R, Kalma J D. In situ measurement of soil moisture: a comparison of techniques. Journal of Hydrology, 2004, 293(1/4): 85-99.

[7] Savva Y, Szlavecz K, Carlson D, Gupchup J, Szalay A, Terzis A. Spatial patterns of soil moisture under forest and grass land cover in a suburban area, in Maryland, USA. Geoderma, 2013, 192(1): 202-210.

[8] Rosenbaum U, Bogena H R, Herbst M, Huisman J A, Peterson T J, Weuthen A, Western A W, Vereecken H. Seasonal and event dynamics of spatial soil moisture patterns at the small catchment scale. Water Resources Research, 2012, 48(10): W10544.

[9] 王存国, 韩士杰, 张军辉, 王树堂, 徐媛. 长白山阔叶红松林表层土壤水分空间异质性的地统计学分析. 应用生态学报, 2010, 21(4): 849-855.

[10] 姚雪玲, 傅伯杰, 吕一河. 黄土丘陵沟壑区坡面尺度土壤水分空间变异及影响因子. 生态学报, 2012, 32(16): 4961-4968.

[11] 李军, 王学春, 邵明安, 赵玉娟, 李小芳. 黄土高原3个不同降水量地点油松林地水分生产力与土壤干燥化效应模拟. 林业科学, 2010, 46(11): 25-35.

[12] 李龙, 姚云峰, 秦富仓, 高玉寒, 张美丽. 黄花甸子流域土壤全氮含量空间分布及其影响因素. 应用生态学报, 2015, 26(5): 1306-1312.

[13] 杨磊, 潘志强, 傅俏燕, 韩启金, 孙珂, 张学文, 王爱春. 资源三号卫星多光谱数据的大气校正研究. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(7): 1903-1907.

[14] Roberts D W, Cooper S V. Concepts and techniques of vegetation mapping//Ferguson D, Morgan P, Johnson FD, eds. Land Classifications Based on Vegetation: Applications for Resource Management. General Technical Report INF-257. Odgen, USA: Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station, 1989: 90-96.

[15] Reich R M, Aguirre-Bravo C, Bravo V A, Briseño M M. Empirical evaluation of confidence and prediction intervals for spatial models of forest structure in Jalisco, Mexico. Journal of Forestry Research, 2011, 22(2): 159-166.

[16] Matheron G. Principles of geostatistics. Economic Geology, 1963, 58(8): 1246-1266.

[17] Cambardella C A, Moorman T B, Parkin T B, Karlen D L, Novak JM, Turco R F, Konopka A E. Field-scalevariability of soil properties in central Iowa soils. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58(5): 1501-1511.

[18] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用. 北京: 科学出版社, 1999: 35-40.

[19] Wilding L P, Drees L R. Spatial variability and pedology. Capítulo 4//Wilding L P, Smeck N E, Hall G F, eds. Pedogenesis and Soil Taxonomy I. Concepts and Interactions. Developments in Soil Science A, Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1983:11.

[20] 朱首军, 丁艳芳, 薛泰谦. 农林复合生态系统土壤水分空间变异性和时间稳定性研究. 水土保持研究, 2000, 7(1): 46-48.

[21] 王盛萍, 张志强, 武军, Edward K, 战伟庆, 肖金强. 坡面林地土壤水分特征函数空间变异性初探. 环境科学研究, 2007, 20(2): 28-35.

[22] 莫菲. 六盘山洪沟小流域森林植被的水文影响与模拟[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2008:86.

[23] 马风云, 李新荣, 张景光, 李爱霞. 沙坡头人工固沙植被土壤水分空间异质性. 应用生态学报, 2006, 17(5): 789-795.

[24] Western A W, Blöschl G, Grayson R B. Geostatistical characterisation of soil moisture patterns in the Tarrawarra catchment. Journal of Hydrology, 1998, 205(1/2): 20-37.

[25] 王小军, 武江涛, 王兵, 温奋翔. 黄土丘陵沟壑区小流域土壤水分空间变异. 生态学杂志, 2015, 34(9): 2568-2575.

[26] 付同刚, 陈洪松, 张伟, 高鹏, 王克林. 喀斯特小流域土壤含水率空间异质性及其影响因素. 农业工程学报, 2014, 30(14): 124-131.

[27] Grayson R B, Western A W, Chiew F H S, BlöschlG. Preferred states in spatial soil moisture patterns: local and nonlocal controls. Water Resources Research, 1997, 33(12): 2897-2908.

[28] Schume H, Jost G, Katzensteiner K. Spatio-temporal analysis of the soil water content in a mixed Norway spruce (*Piceaabies* (L.) Karst.) - European beech (*Fagussylvatica* L.) stand. Geoderma, 2003, 112(3/4): 273-287.

[29] 李阳兵, 高明, 魏朝富, 谢德体, 刘国一. 岩溶山地不同土地利用土壤的水分特性差异. 水土保持学报, 2003, 17(5): 63-66.